

Termodinâmica

Aula 12:

# Ciclo Rankine

DSc. Eng. Samuel Moreira Duarte Santos

Engenheiro Mecânico

CREA MG 106478D

Rio de Janeiro, 21 de junho 2023

Samuel Moreira Duarte Santos

# Agenda

- Vapor d'água;
- Calor de processo;
- Ciclo Rankine;
- Melhorando eficiência do ciclo Rankine;
- Irreversibilidades.

# Vapor d'água

# Vapor d'água



O vapor é utilizado para geração de energia e também em indústrias de processo como açúcar, papel, fertilizantes, refinarias, petroquímica, química, alimentícia, fibra sintética e têxteis, entre outras.



# Qualidades do Vapor d'água

- As principais qualidades do vapor gerado por caldeiras são:
  - Elevado calor latente;
  - Capacidades de transportar calor para aquecimento de processos;
  - Fácil de controlar e distribuir; e
  - Realizar trabalho.



# Vapor d'água saturado

- Calor sensível: aquecimento da água até o ponto de ebulição sob pressão;
- Calor latente: mudança de estado de água para vapor sob pressão;
- O vapor d'água coexiste em equilíbrio com a água, em igualdade de temperatura e pressão;
- Relação biunívoca entre a temperatura e a pressão do vapor saturado; e
- Esta propriedade facilita o controle dos processos térmicos.

# Vapor d'água superaquecido

- Aquecendo-se o vapor saturado além da sua temperatura de equilíbrio com a pressão, não estando mais em contato com a água, obtêm-se o vapor superaquecido usado para geração de força motriz a partir de turbinas a vapor;
- O vapor superaquecido não é praticamente utilizado como fonte de calor devido ao seu baixo calor específico ( $\sim 0,48 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$ );
- O vapor superaquecido, após expansão em turbina para gerar trabalho mecânico, pode ser misturado com água para cogerar vapor saturado como subproduto, proporcionando grandes economias quando possível reaproveitá-lo para outras aplicações.

# Aplicações vapor saturado

- Uma das vantagens do vapor saturado em processos industriais é a relação biunívoca entre pressão e temperatura;
- Assim, controlando a pressão, essa temperatura está limitada e nunca será ultrapassada, podendo ser entendida como uma segurança adicional para processos termicamente sensíveis.
- Geração de calor para inúmeros processos de **troca de calor indireta** como:
  - Aquecimento de reatores na indústria química, farmacêutica e petroquímica;
  - Aquecimento de banhos na galvanoplastia;
  - Cocção, esterilização e fermentação na indústria de alimentos, bebidas (cerveja e xarope para refrigerantes) e cozinhas industriais;
  - Esterilização e vulcanização em moldes e autoclaves;
  - Aquecimento de reservatórios e traçagem de linhas para fluidos viscosos, atomização de óleos pesados;
  - Aeração de ar quente limpo através de radiadores;
  - Criação de micro-organismos em temperaturas muito bem controladas



# Aplicações vapor saturado

- Processos **de troca de calor direta**, também chamados vapor vivo como:
  - Fornecimento de calor úmido na indústria de panificação (produtos especiais);
  - Cocção de sardinhas na lata aberta emborcada (calor úmido para escorrer resíduos);
  - Esterilização por vapor direto em embalagens, enxoval e material hospitalar inclusive tratamento de resíduos de serviços de saúde;
  - Hidratação na produção de papel;
  - Secagem de madeiras com umidade controlada;
  - Limpeza de superfícies com esterilização, como limpeza de couros e estofados;
  - Limpeza de superfícies com gordura (Lavapor);
  - Agente propelente em injetores para sucção de líquidos ou geração de vácuo.

# Aplicações vapor superaquecido

- APLICAÇÕES DO VAPOR SUPERAQUECIDO
- Geração de propulsão, principalmente para geração de força motriz (trabalho mecânico) pelo acionamento de turbinas a vapor (ciclo Rankine), com diversas aplicações como geração de energia elétrica, moendas de cana e bombeio de líquidos;
- A necessidade do vapor ser superaquecido deve-se ao fato de que não pode haver gotas de líquido impactando nas palhetas da turbina, portanto o vapor deve sair da turbina apresentando ainda algum grau de superaquecimento; e
- Lançadores de aeronaves em porta-aviões.

# Calor na indústria

# Calor na indústria

01

A utilização de calor nas indústrias é frequente;

02

Em sua grande parte ocorre, sob níveis não muito altos de temperatura, ao redor de 150°C a 200°C, níveis de temperaturas típicas para os processos de secagem, cozimento, evaporação etc.

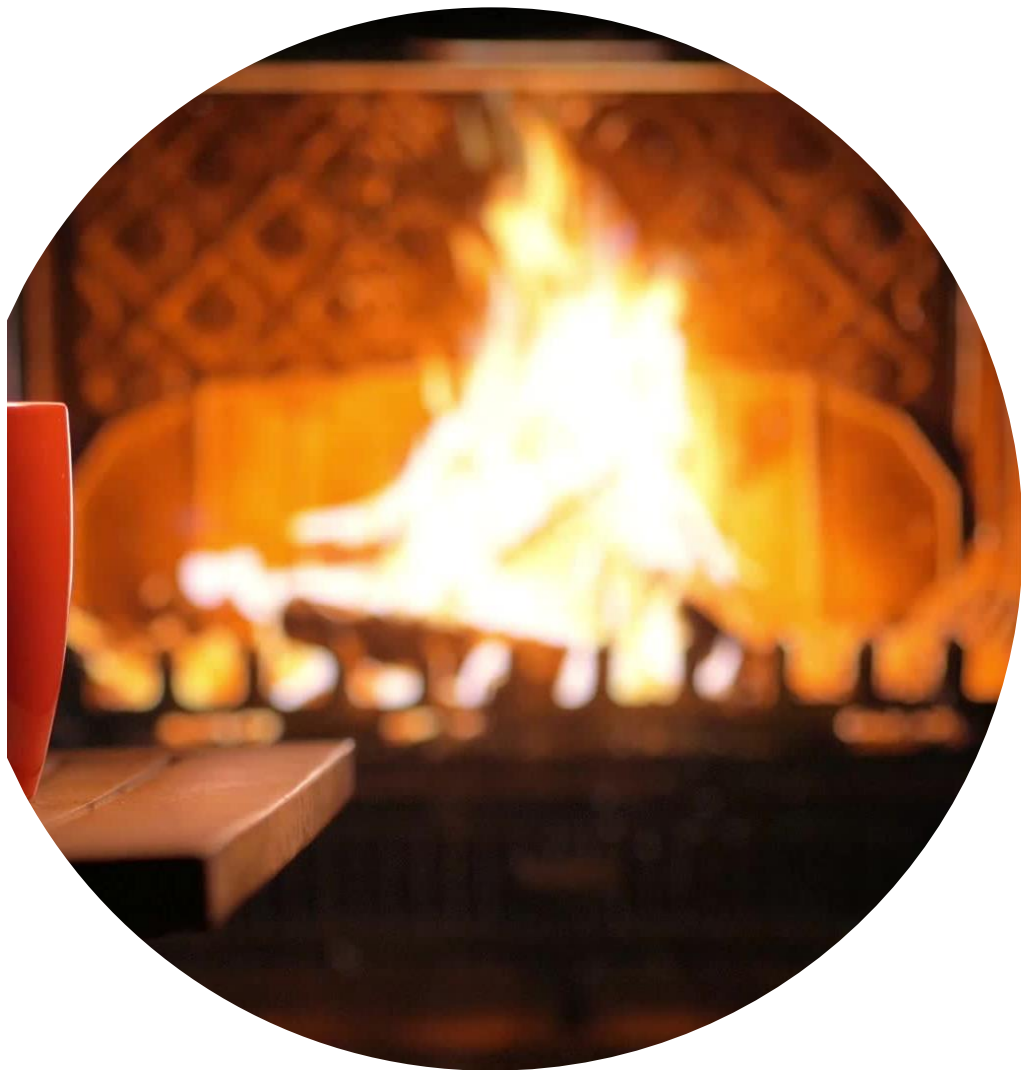
03

Porém, para a produção desta energia térmica são geralmente empregados combustíveis cujas chamas estão entre 1400°C e 1800°C.

04

Assim, o processo convencional de produção e utilização de calor em indústrias parte de uma energia térmica de alta qualidade para fornecer uma energia de baixa qualidade;

# Calor na indústria



É por isto que mesmo as melhores caldeiras e fornos, ainda que alcancem rendimentos energéticos próximos a 90%, destroem-se irreversivelmente mais da metade da qualidade do fluxo de calor;

A cogeração, ao produzir trabalho e calor úteis, reduz as perdas de energia e permite abastecer ambas as demandas com quase o mesmo consumo de combustível; Estes fundamentos da termodinâmica é que sustentam todas as vantagens da cogeração, já que níveis mais altos de eficiência implicam a redução do consumo de combustíveis, assim como de todos os demais custos associados, inclusive o custo ambiental.

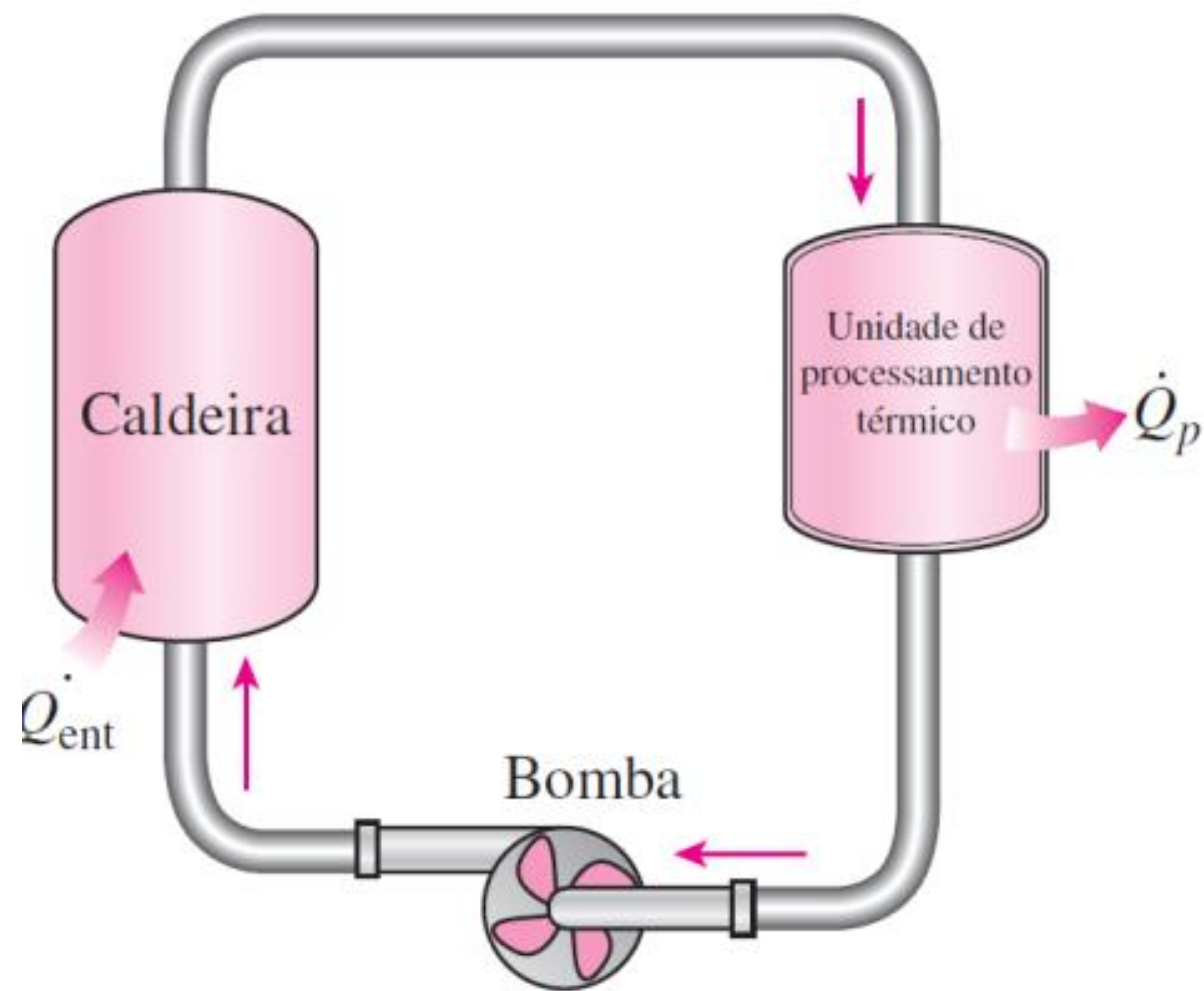
# Calor na indústria

Muitas indústrias necessitam de calor de processo;

Dispositivos que necessitam de calor;

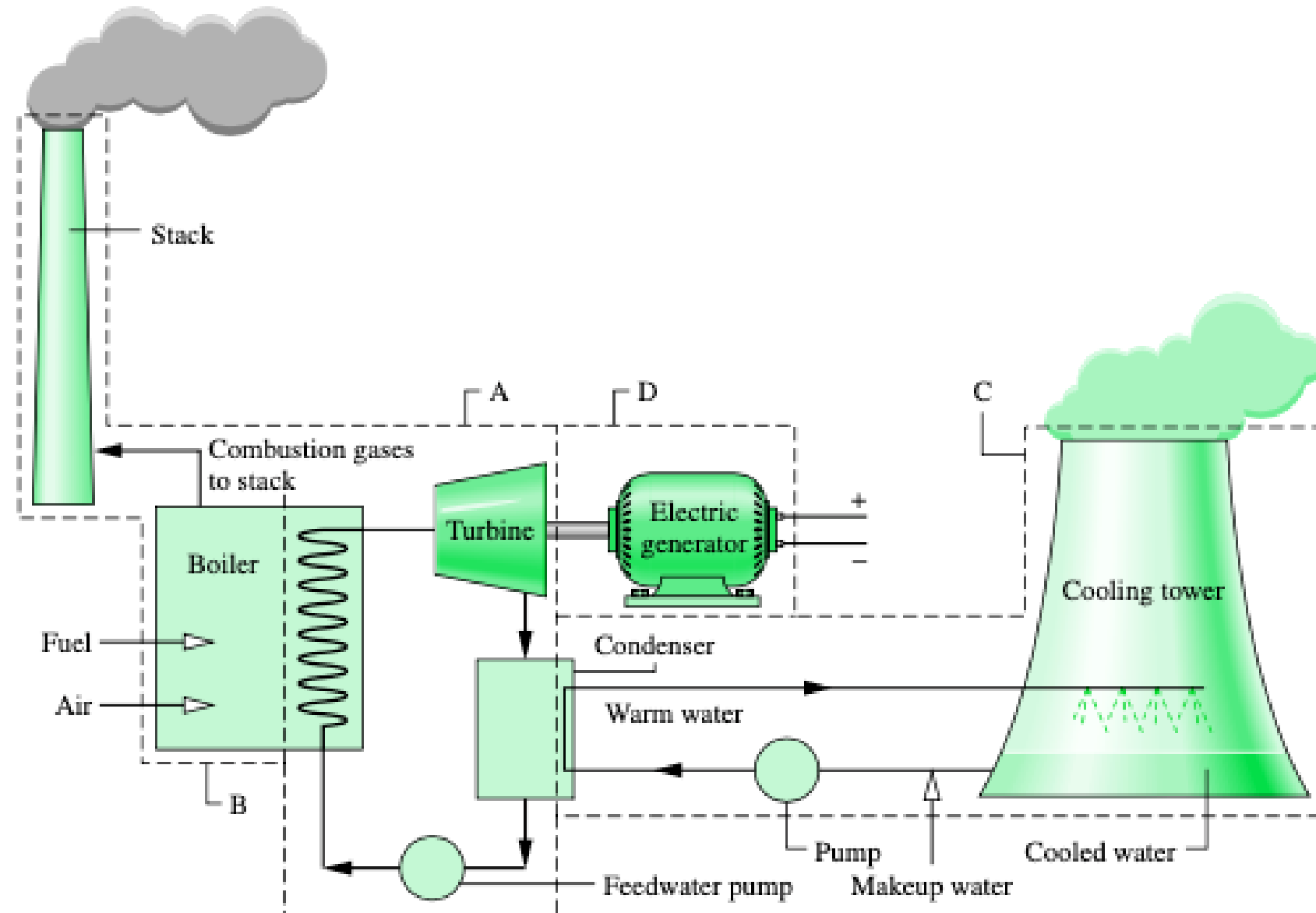
Nessas indústrias o calor de processo geralmente é fornecido por vapor de água de 5 atm à 7 atm e de 150°C a 200°C;

1. Uma opção para gerar calor de processo seria por meio de uma caldeira. As caldeiras, geralmente tem elevadas temperaturas  $\approx 1.400^{\circ}\text{C}$ . Assim, colocar uma caldeira para gerar vapor a  $150\sim 200^{\circ}\text{C}$  é altamente custoso e com alta geração de entropia ( $\Delta T$  muito alto)
2. Outra opção é a cogeração



# Ciclo Rankine

# Ciclo Rankine



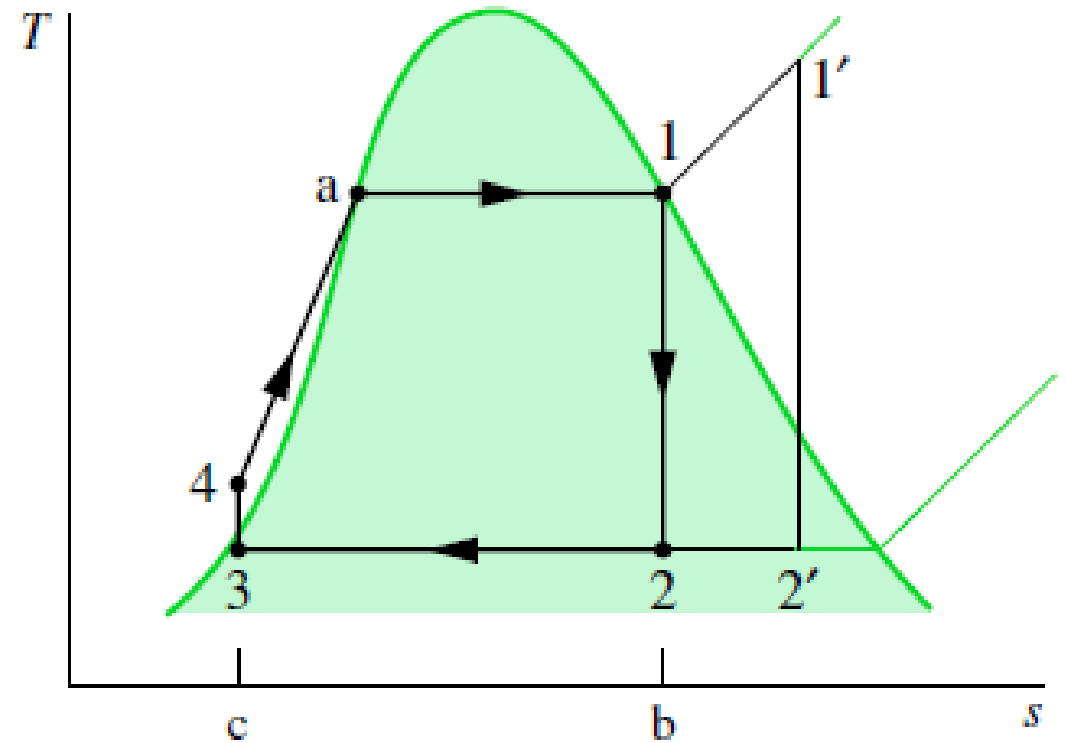
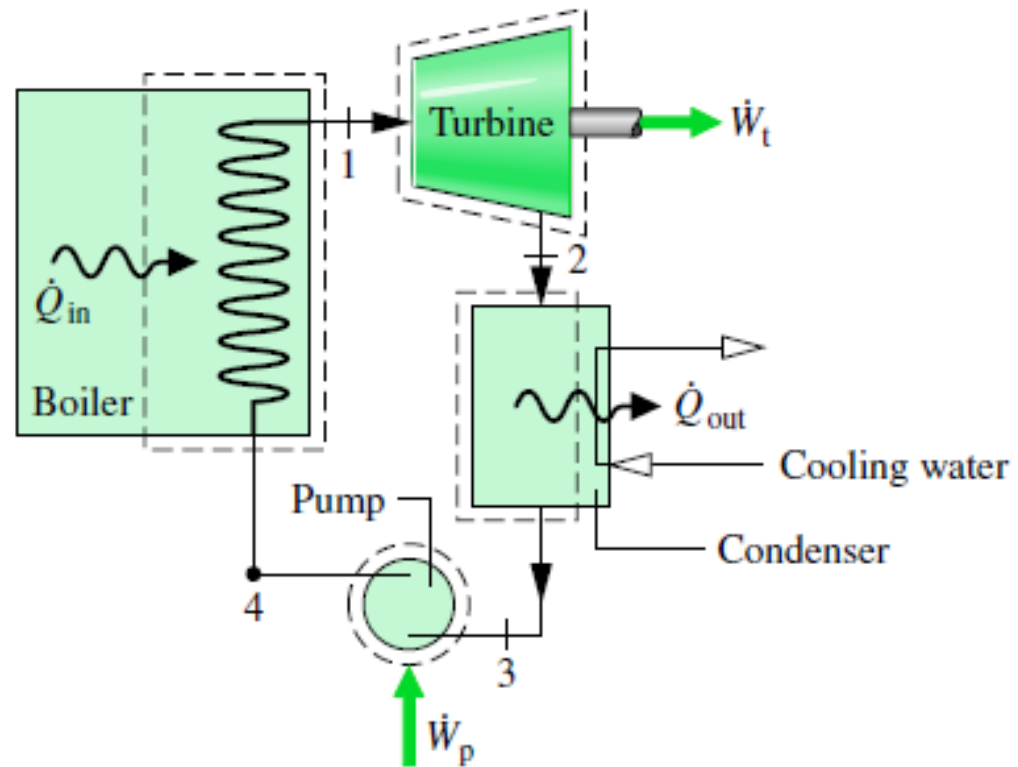


# Ciclo Rankine

- A maior perda em uma central térmica a vapor não é o calor rejeitado no condensador, uma inevitável imposição termodinâmica, mas as perdas irreversíveis associadas às grandes diferenças de temperatura que se observam na caldeira;
- Uma central termoelétrica consegue converter em eletricidade no máximo a metade do calor produzido na queima do combustível. A maior parte é perdida;
- Em geral, estas perdas de calor são conduzidas para a água de resfriamento dos condensadores ou para a atmosfera, através das torres de resfriamento, e não produzem qualquer efeito útil.

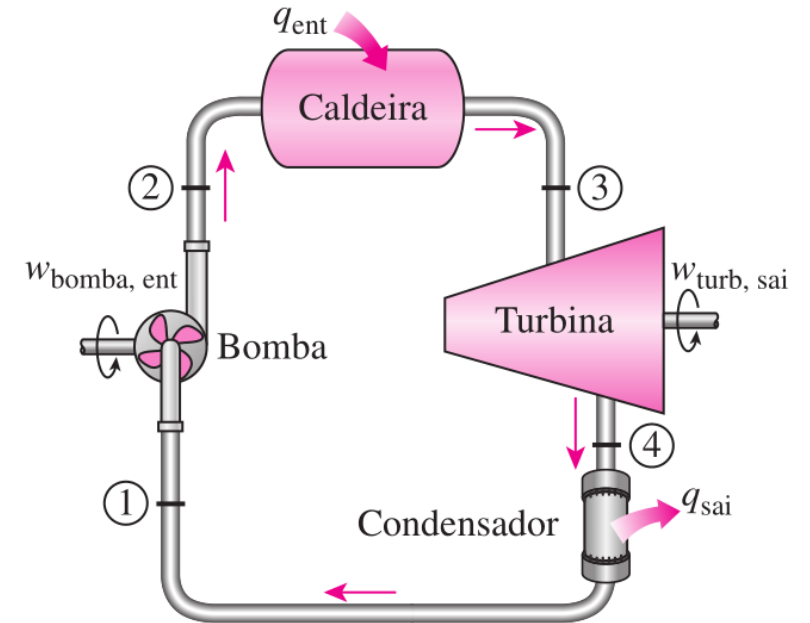
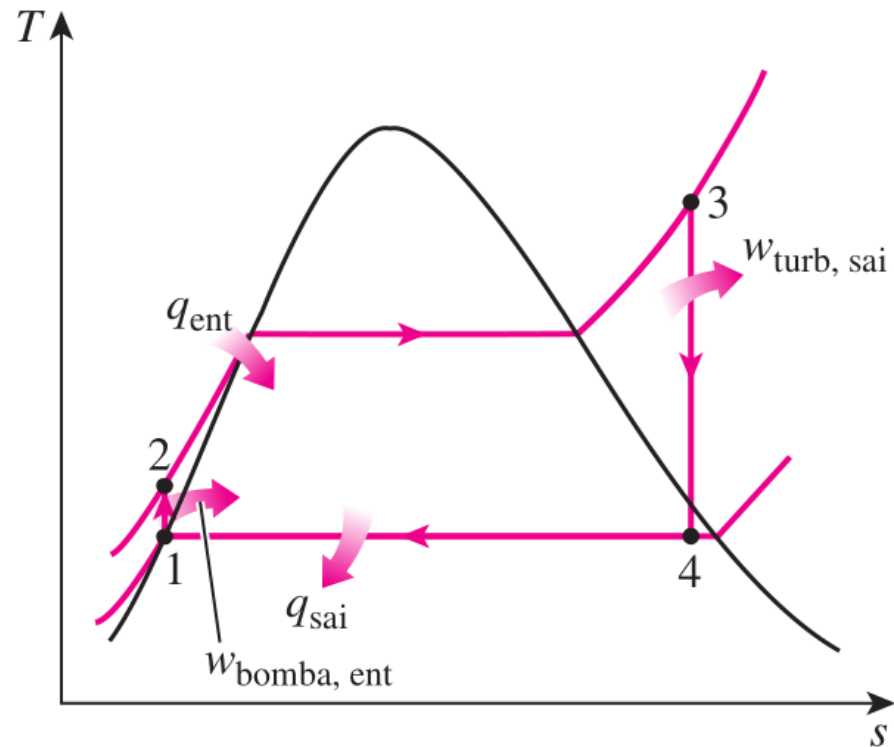


# Ciclo Rankine

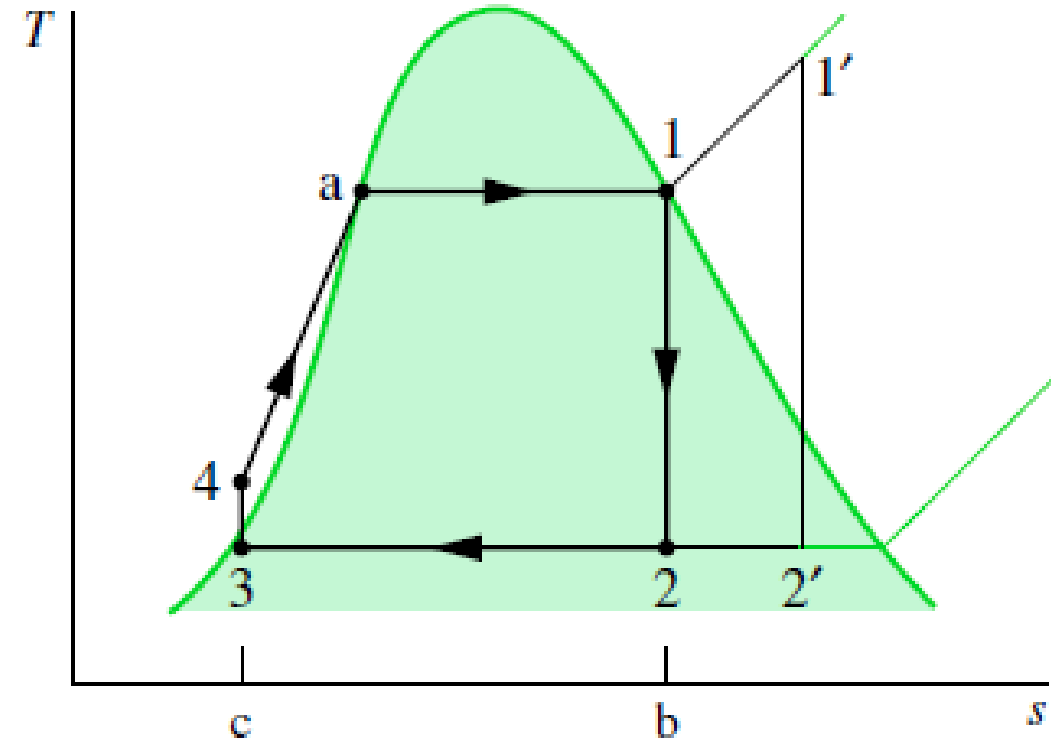
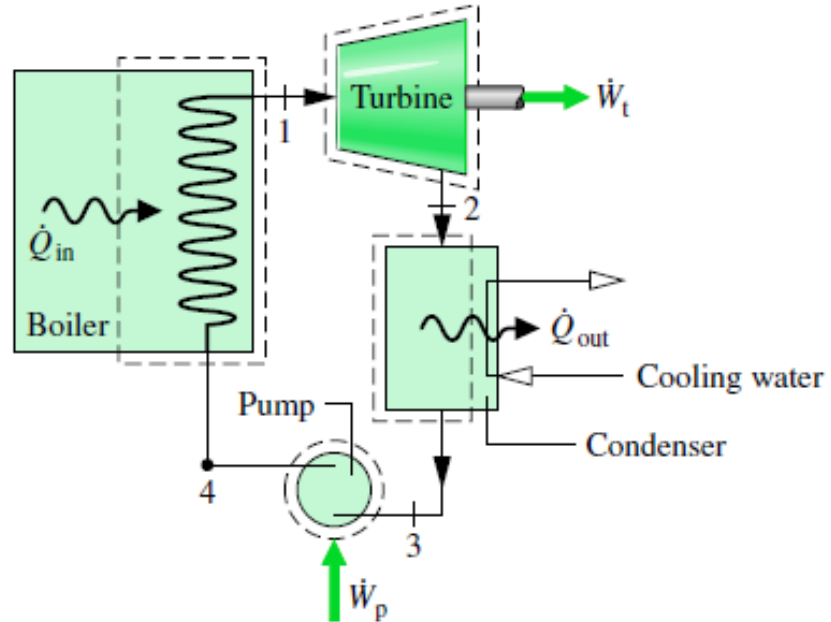


# Ciclo Rankine

- É o ciclo ideal para os ciclos de potência a vapor;
- Os problemas práticos de Carnot são eliminados com o ciclo Rankine; e
- Ciclo Rankine ideal não envolve nenhuma irreversibilidade.



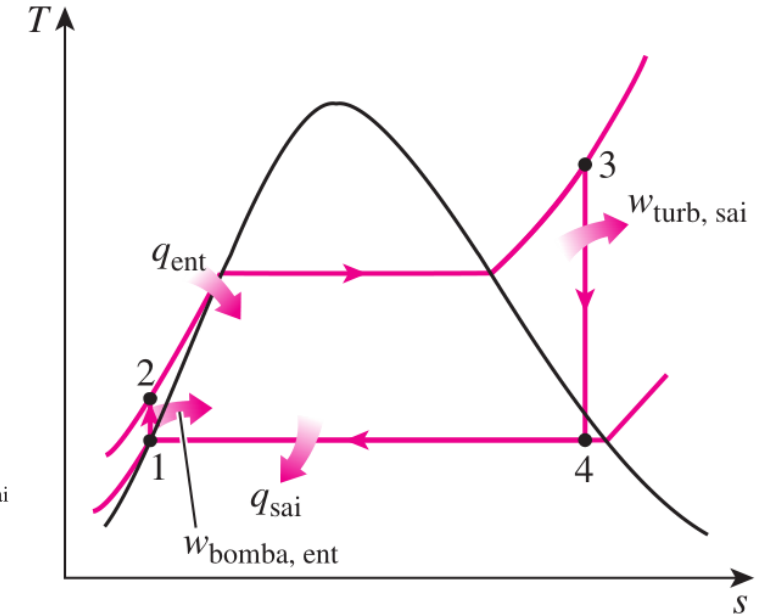
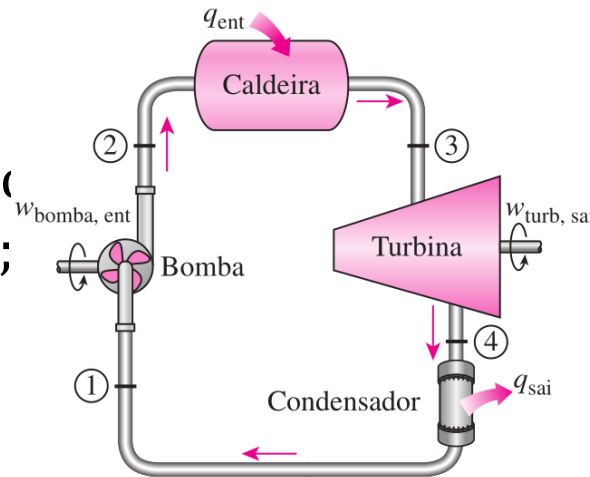
# Ciclo Rankine ideal



- 1-2 Compressão isentrópica em uma bomba;
- 2-3 Fornecimento de calor a pressão constante em uma caldeira;
- 3-4 Expansão isentrópica em uma turbina; e
- 4-1 Rejeição de calor a pressão constante em um condensador.

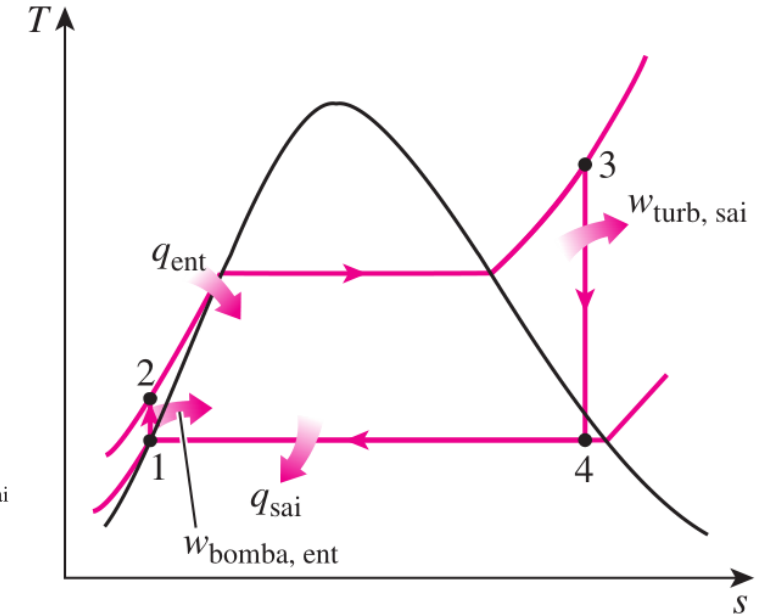
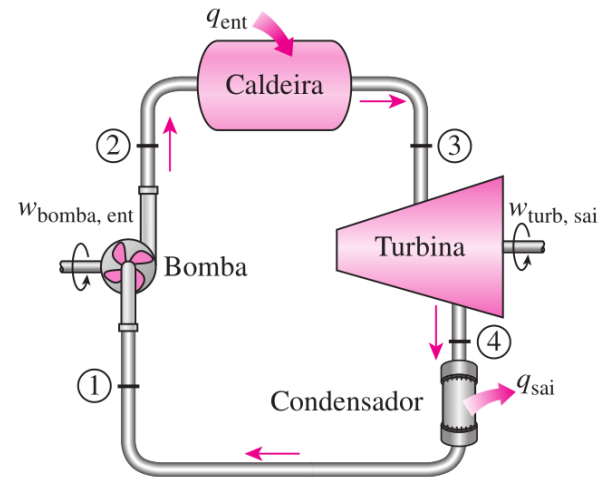
# Ciclo Rankine ideal

- 1-2 Bomba (Adiabático ideal = Isentrópica)
  - Fluido entra como líquido saturado ( $x=0$ );
  - Temperatura do fluido aumenta muito pouco na bomba; e
  - Necessita de trabalho.
- 2-3 Caldeira (Pressão constante)
  - Fluido entra como líquido comprimido;
  - Fluido sai como vapor superaquecido;
  - A caldeira é basicamente um grande trocador de calor;
  - O calor vem de:
    - Gases de combustão;
    - Reatores nucleares; e
    - Outros.
  - Também chamada de gerador de vapor.



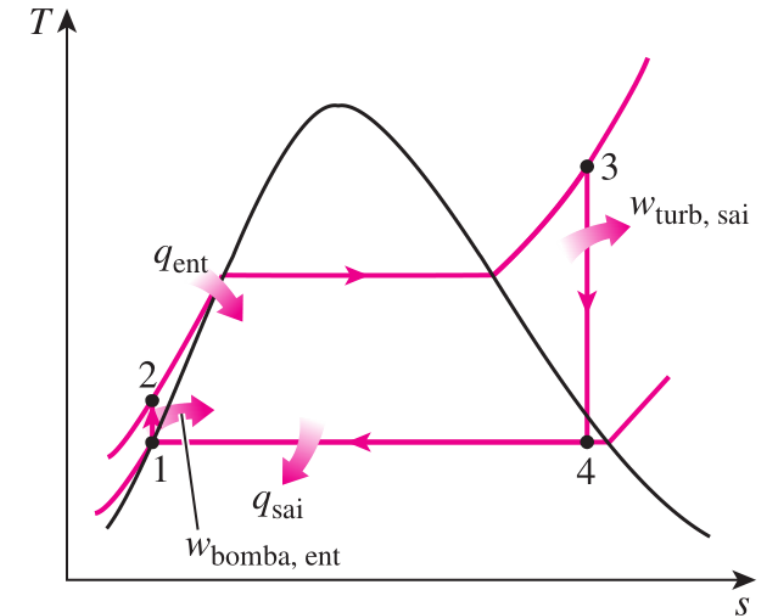
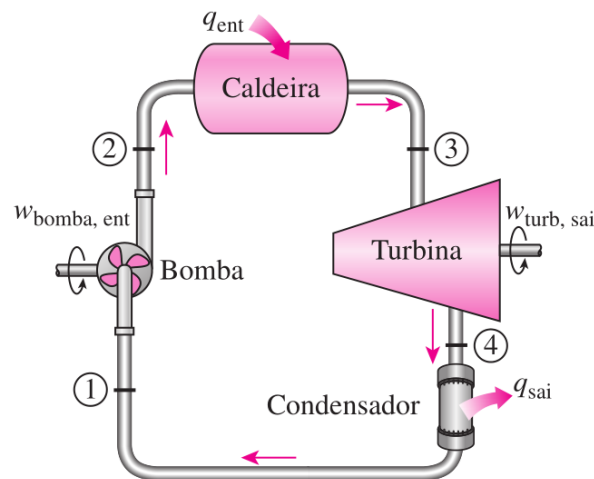
# Ciclo Rankine ideal

- 3-4 Turbina a vapor (Adiabático ideal = Isentrópica):
  - Fluido entra como vapor superaquecido;
  - Fluido sai como estado de saturação com título muito elevado;
    - Não é desejável muita umidade na turbina pois pode danificá-la ou reduzir sua vida útil.
- Produz trabalho.



# Ciclo Rankine ideal

- 4-1 Condensador (Pressão constante);
  - Fluido entra como estado de saturação com título muito elevado;
- Fluido sai como líquido saturado ( $x=0$ );
- O condensador é basicamente um grande trocador de calor;
- Rejeita o calor para um reservatório térmico:
- Exemplos
  - Lago;
  - Rio;
  - Oceano; e
  - Atmosfera.



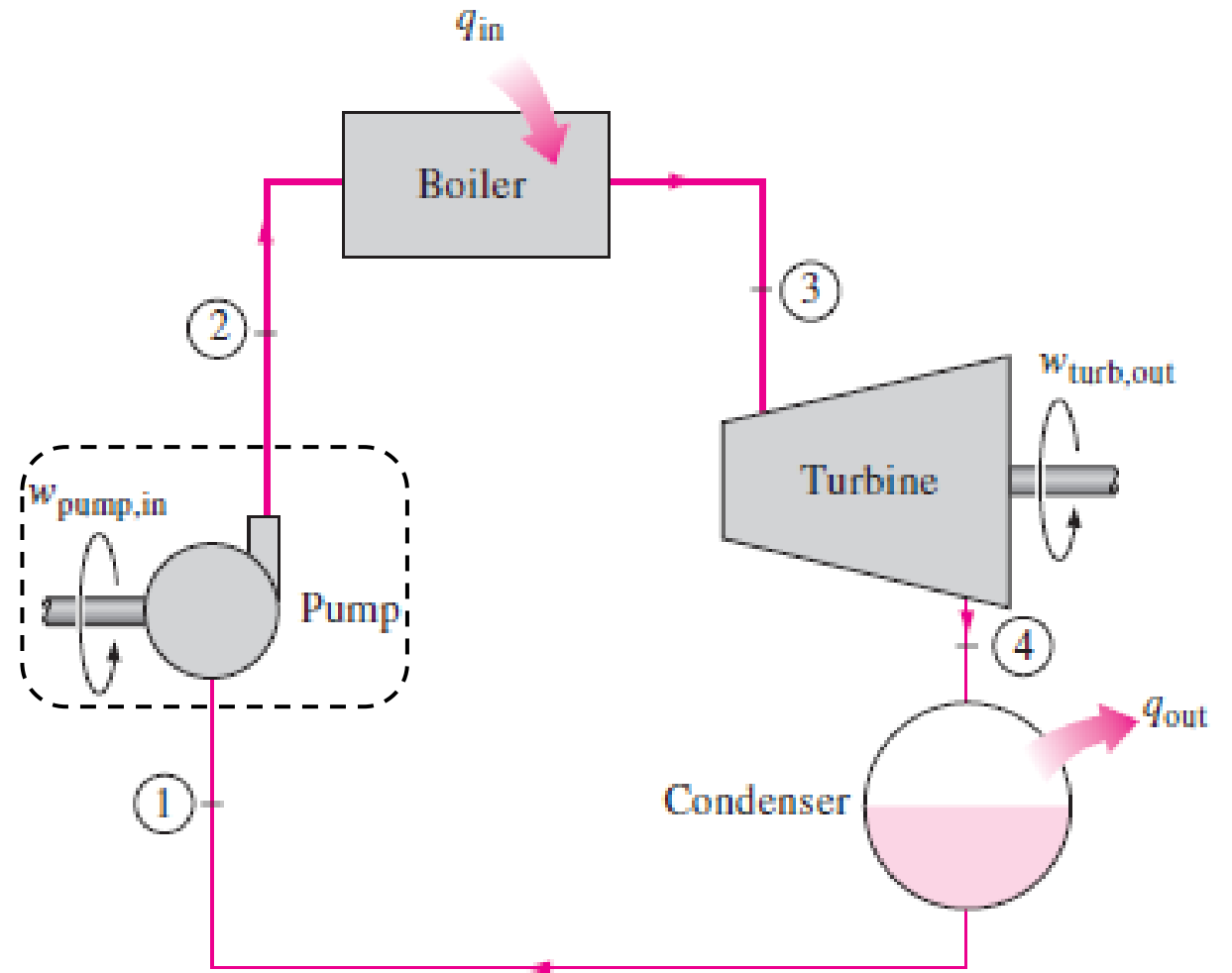
# Ciclo Rankine

1ª Lei aplicada no V.C bomba

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{out}} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{\text{in}} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

for each exit                      for each inlet

$$w_{\text{pump,in}} = h_2 - h_1$$





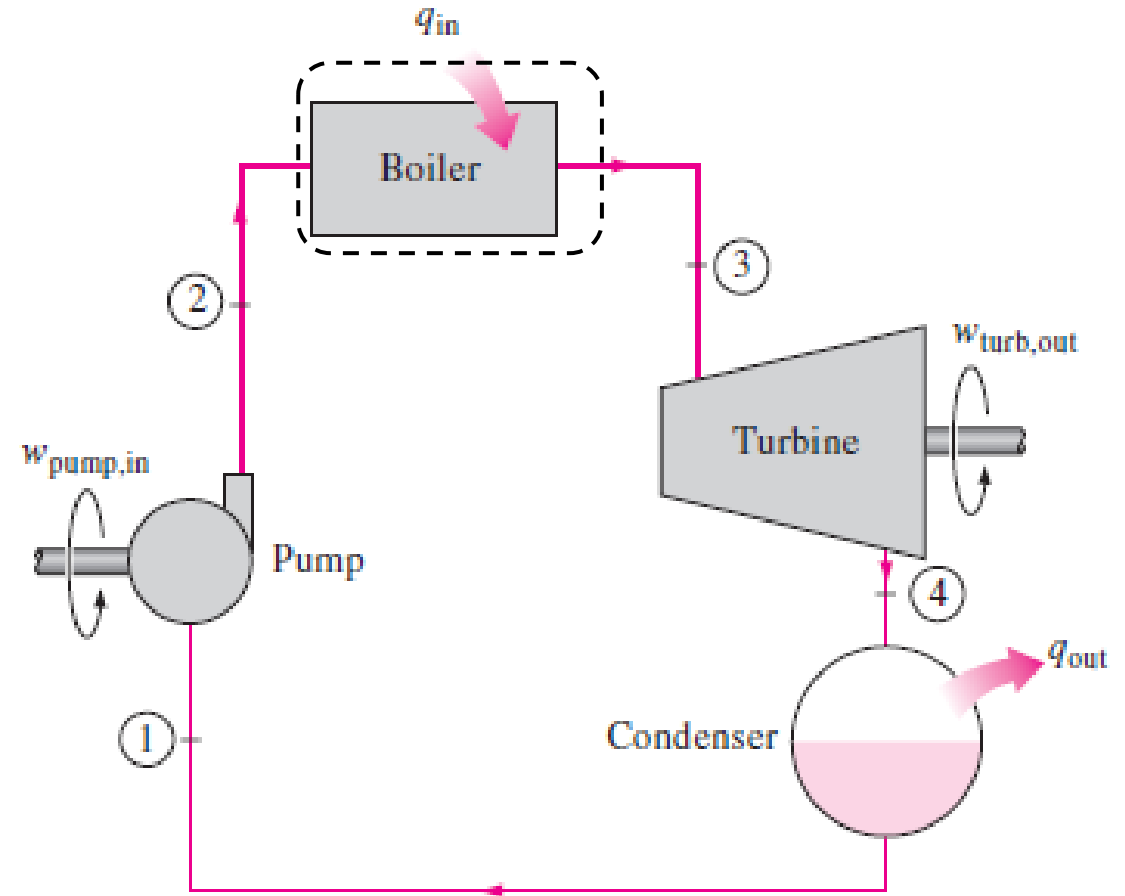
# Ciclo Rankine

1ª Lei aplicada no V.C caldeira

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{out}} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{\text{in}} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

for each exit                      for each inlet

$$q_{\text{in}} = h_3 - h_2$$



# Ciclo Rankine: turbina a vapor



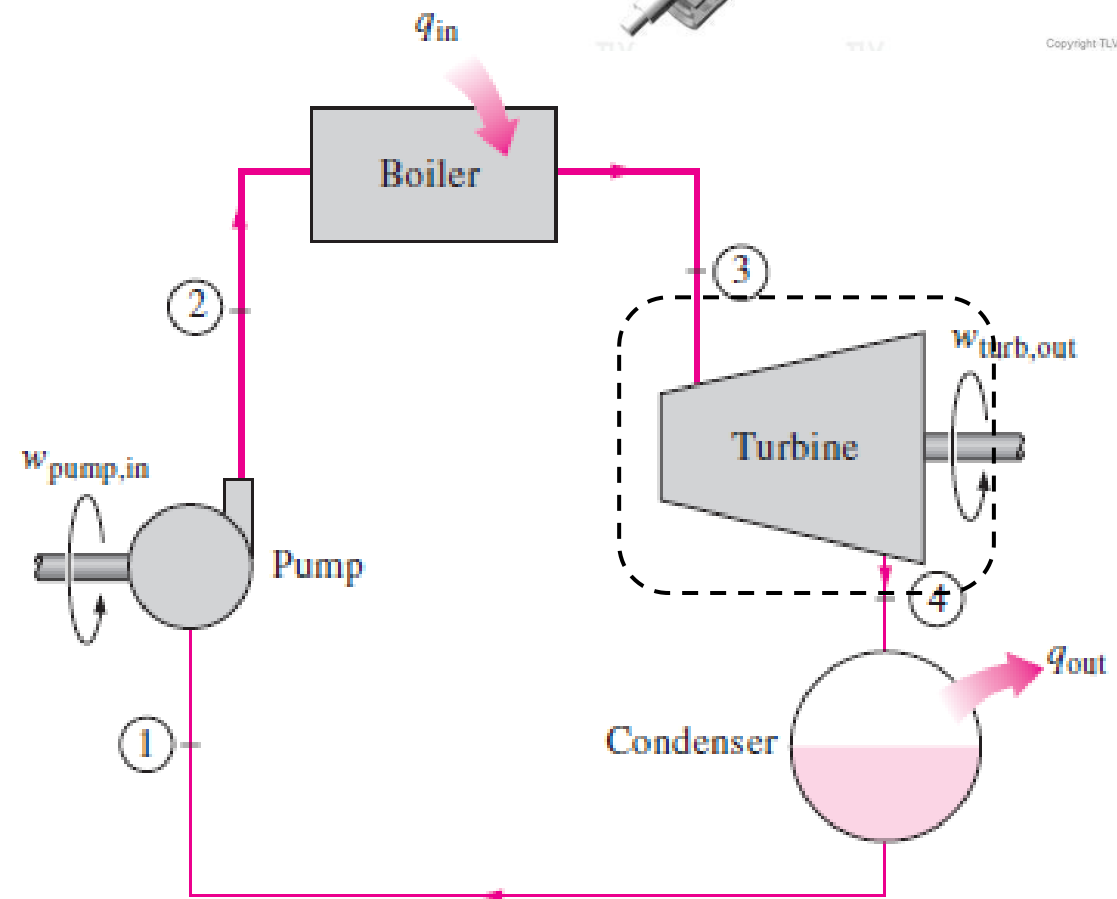
# Ciclo Rankine

1ª Lei aplicada no V.C turbina

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{out}} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{\text{in}} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

for each exit                      for each inlet

$$w_{\text{turb,out}} = h_3 - h_4$$

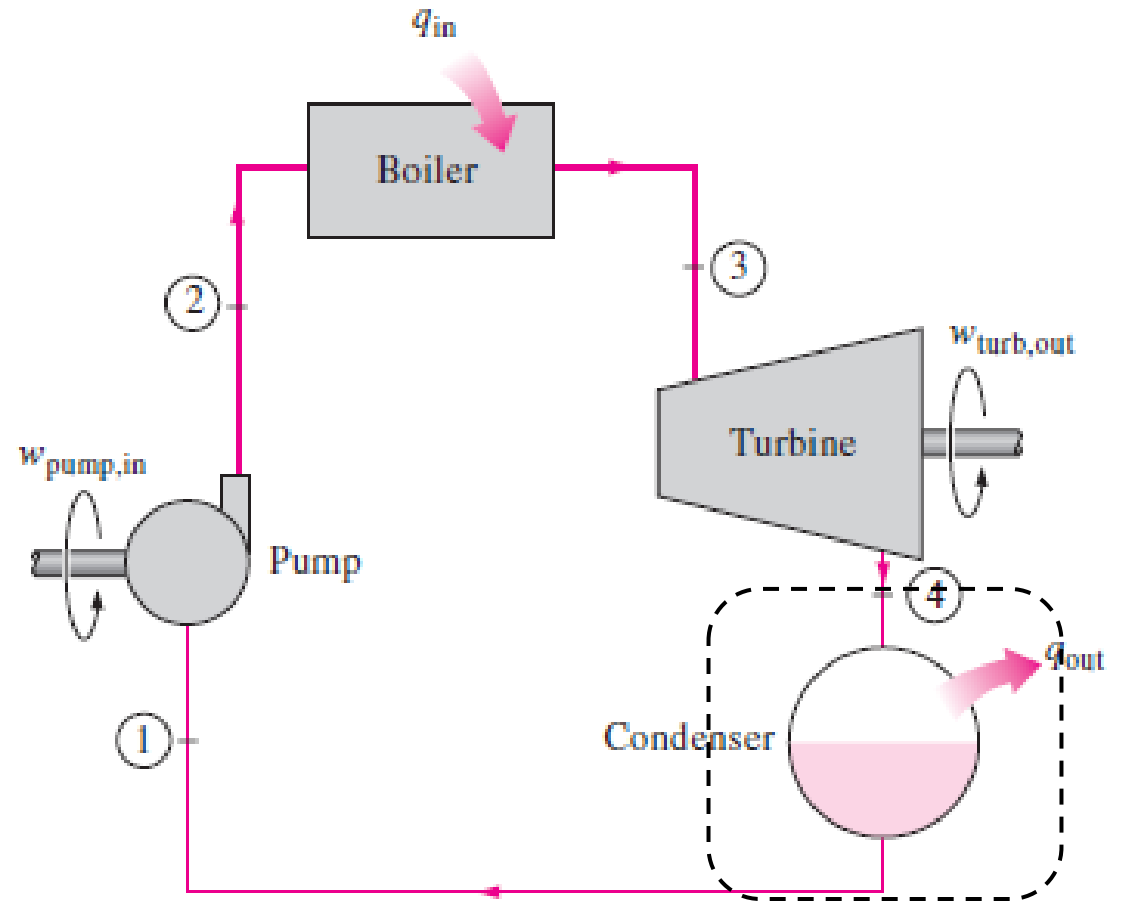


# Ciclo Rankine

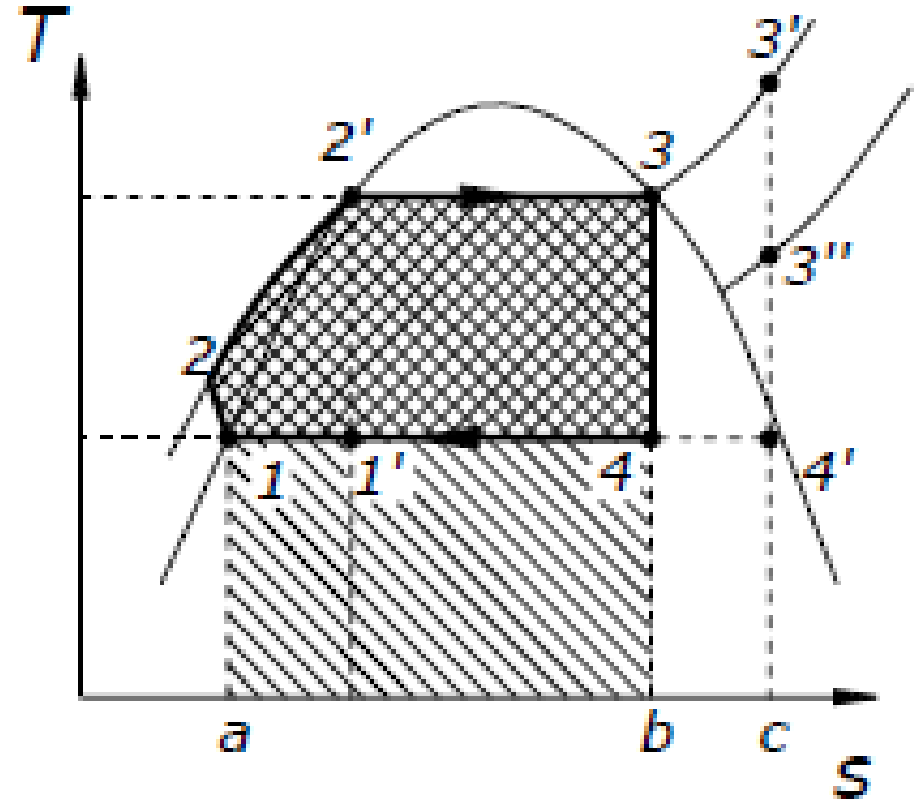
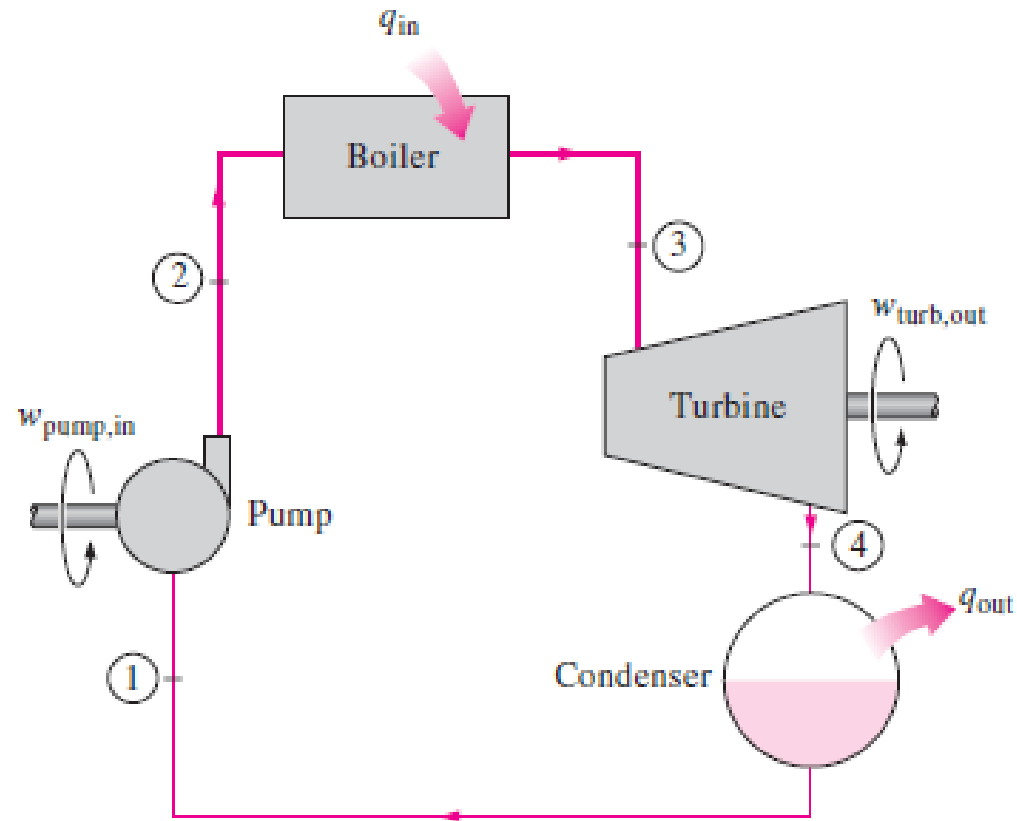
1ª Lei aplicada no V.C condensador

$$\cancel{\dot{Q}} - \cancel{\dot{W}} = \sum_{\text{out}} \dot{m} \underbrace{\left( \cancel{h} + \cancel{\frac{V^2}{2}} + \cancel{gz} \right)}_{\text{for each exit}} - \sum_{\text{in}} \dot{m} \underbrace{\left( \cancel{h} + \cancel{\frac{V^2}{2}} + \cancel{gz} \right)}_{\text{for each inlet}}$$

$$q_{\text{out}} = h_4 - h_1$$



# Ciclo Rankine



$$\eta_{\text{termico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{\text{área } 1-2-2'-3-4-1}{\text{área } a-2-2'-3-b-a}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{w_T - w_B}{q_H} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

# Ciclo Rankine

$$\eta = \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

Razão entre as potências da  
bomba e da turbina

$$\eta = \frac{\dot{W}_t/\dot{m} - \dot{W}_p/\dot{m}}{\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$

$$\text{bwr} = \frac{\dot{W}_p/\dot{m}}{\dot{W}_t/\dot{m}} = \frac{(h_4 - h_3)}{(h_1 - h_2)}$$

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m} - \dot{Q}_{\text{out}}/\dot{m}}{\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{out}}/\dot{m}}{\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m}} \\ &= 1 - \frac{(h_2 - h_3)}{(h_1 - h_4)}\end{aligned}$$

# Aumentando a eficiência do ciclo Rankine

# Como podemos aumentar a eficiência do ciclo Rankine?

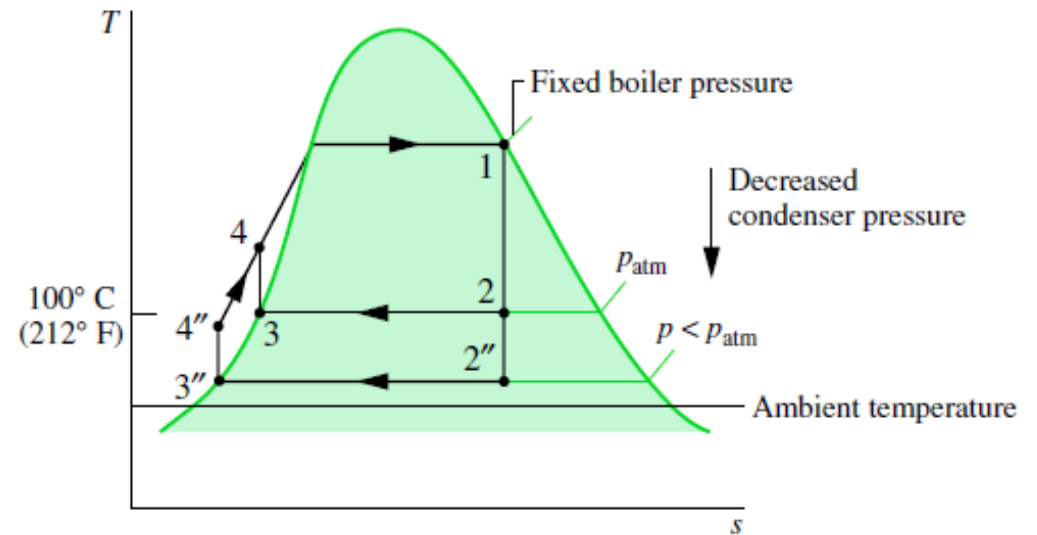
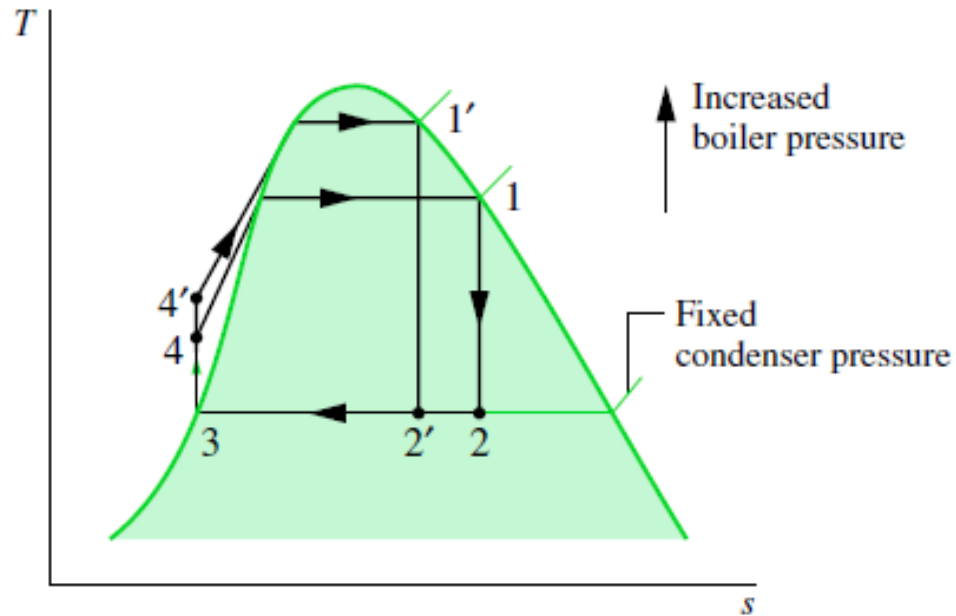
- A ideia básica por trás de todas as modificações propostas para aumentar a eficiência térmica de um ciclo de potência é a mesma:
  - **Aumentar a temperatura média ( $T_H$ )** na qual o calor é transferido para o fluido de trabalho na caldeira;
  - **Diminuir a temperatura média ( $T_L$ )** na qual o calor é rejeitado do fluido de trabalho no condensador.
- Ou seja, a temperatura média do fluido deve ser a mais alta possível durante o fornecimento de calor e a mais baixa possível durante a rejeição de calor.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



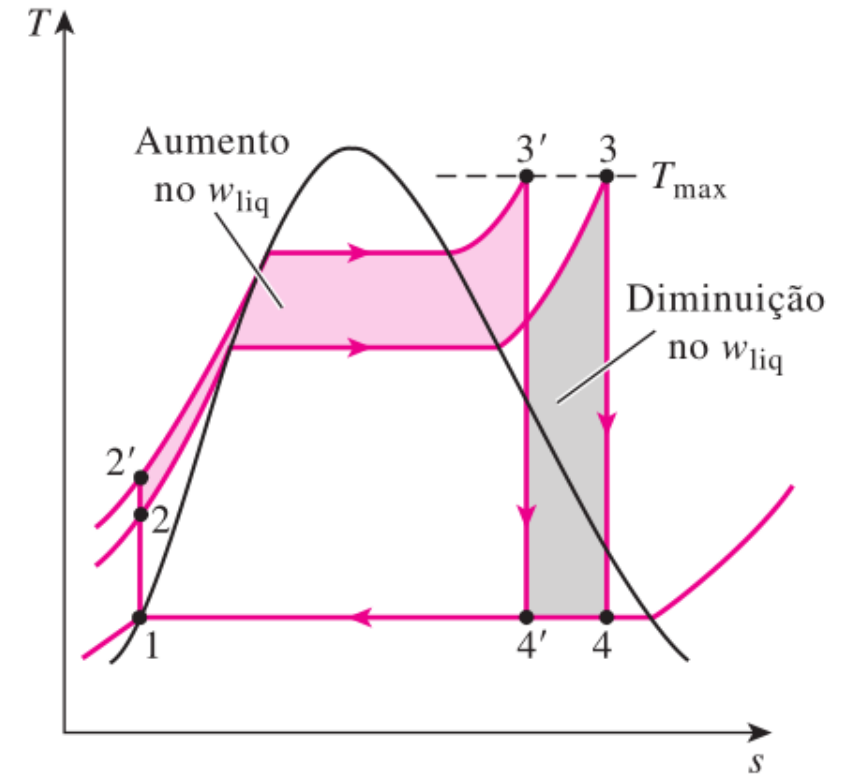
# Melhorando o rendimento do Ciclo Rankine

- Aumentando o trabalho líquido:
  - Aumento da pressão da caldeira; e
  - Redução da pressão do condensador.



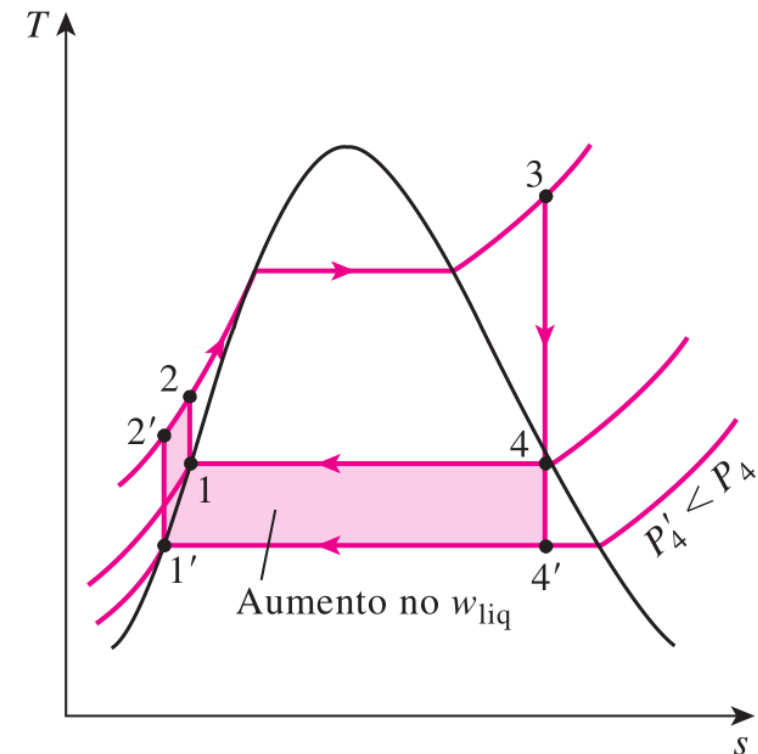
# Aumento da pressão na caldeira

- Eleva a eficiência térmica do ciclo;
- O conteúdo de umidade do vapor na saída da turbina aumenta;
- Esse efeito colateral indesejado pode ser corrigido pelo reaquecimento do vapor;
- Muitas das usinas a vapor modernas operam a pressões supercríticas ( $P > 22,06 \text{ MPa}$ ) e têm eficiências térmicas de cerca de 40% para as usinas a combustível fóssil e 34% para as usinas nucleares; e
- As eficiências mais baixas das usinas nucleares se devem às temperaturas máximas mais baixas usadas naquelas usinas por questões de segurança.



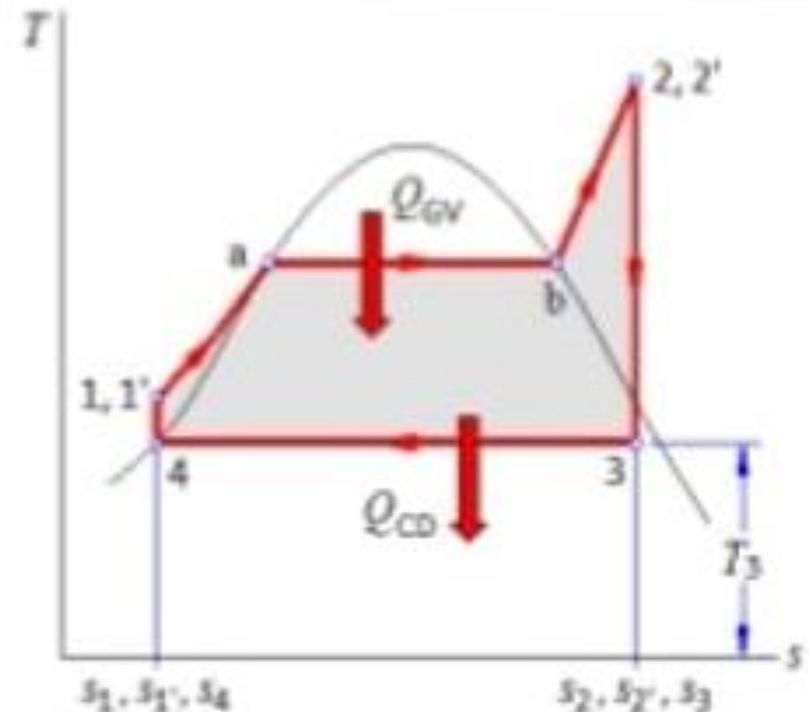
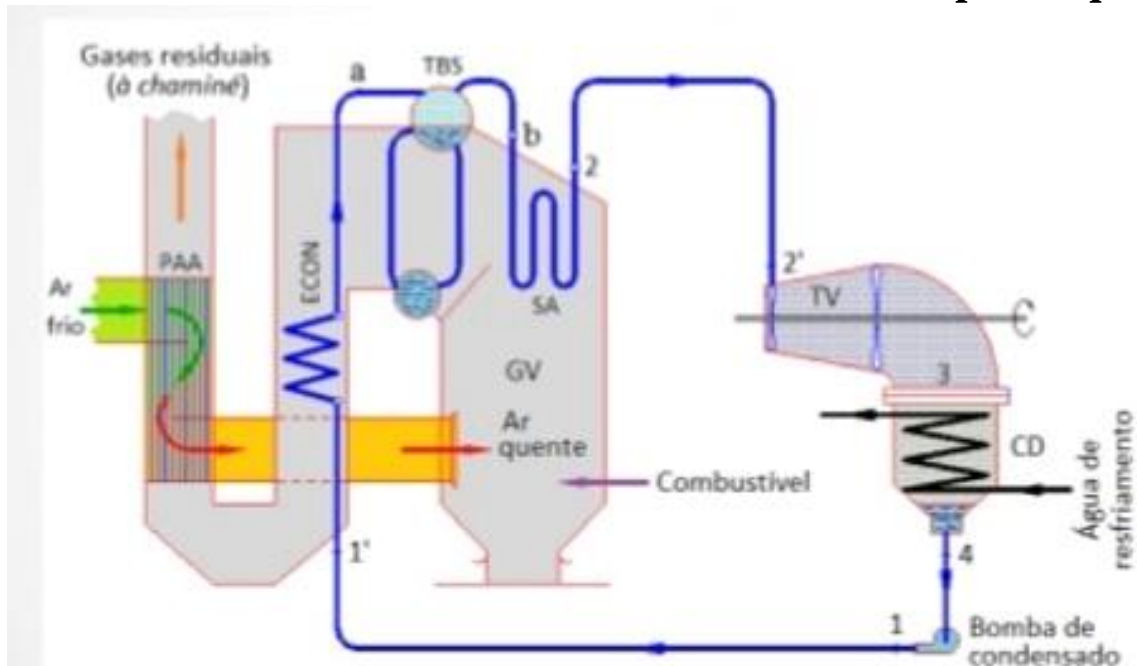
# Redução da pressão do condensador

- Para aproveitar o aumento da eficiência a baixas pressões, os condensadores das usinas a vapor geralmente operam bem abaixo da pressão atmosférica;
- Isso cria a possibilidade da infiltração do ar ambiente para o interior do condensador, e mais importante ainda é o fato de que ela aumenta a umidade do vapor nos estágios finais da turbina;
- A presença de grandes quantidades de umidade é **altamente indesejada** nas turbinas, porque isso diminui sua eficiência e provoca a erosão de suas pás.
- Existe um **limite inferior** para a temperatura dentro do condensador: A temperatura do condensador não pode ser menor que a temperatura do reservatório térmico a baixa temperatura.
- Isso é imperativo para que haja troca de calor.



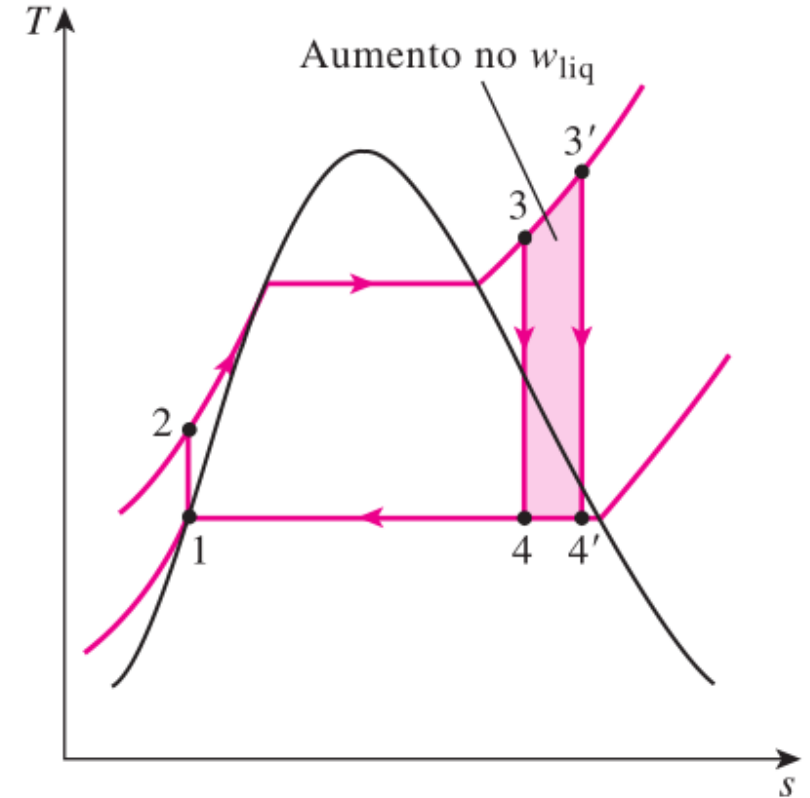
# Melhorando o rendimento do Ciclo Rankine

- Aumentando o trabalho líquido:
- Superaquecendo o vapor:



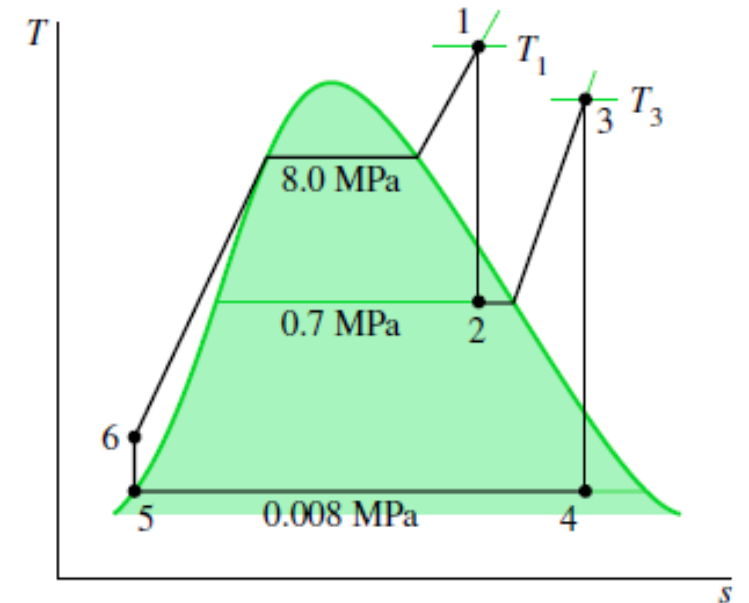
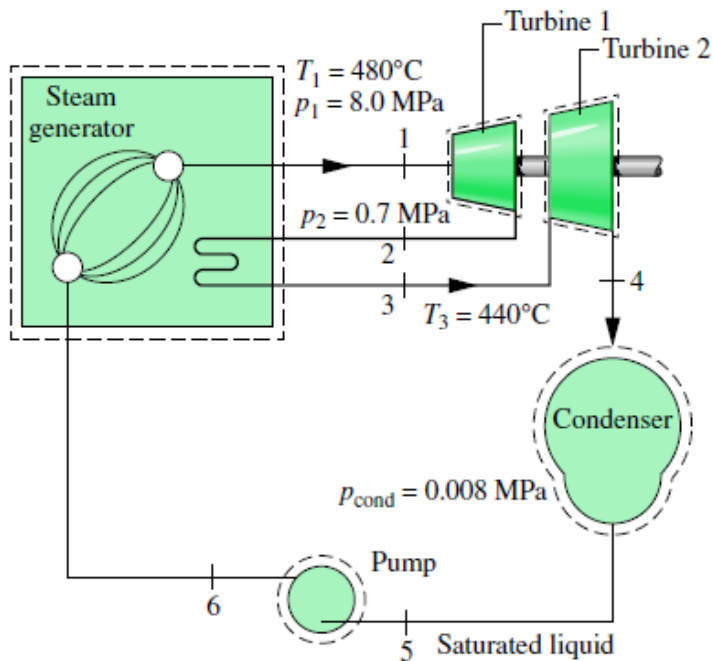
# Superaquecendo o vapor

- O efeito global é um aumento na eficiência térmica, uma vez que a temperatura média com a qual o calor é adicionado aumenta.
- O superaquecimento do vapor a temperaturas mais altas tem outro efeito bastante desejável: ele diminui o conteúdo de umidade do vapor na saída da turbina
- A temperatura em que o vapor pode ser superaquecido é limitada por considerações metalúrgicas. ( $T_{\text{max}}(\text{atual}) \approx 620^{\circ}\text{C}$ )



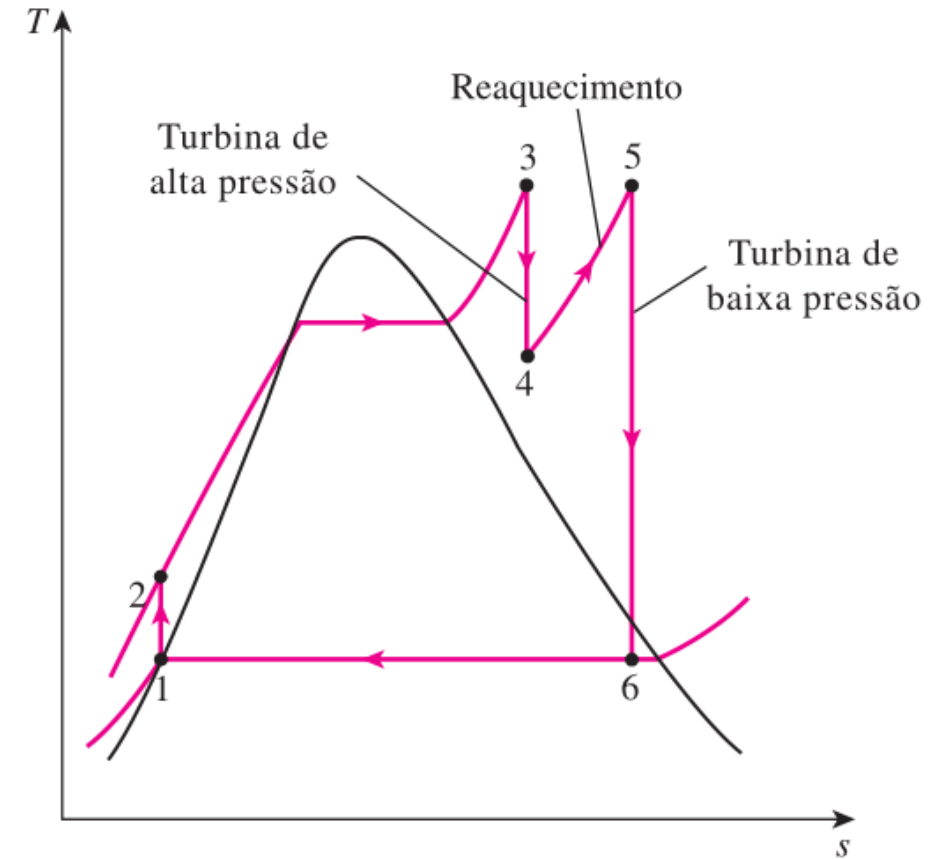
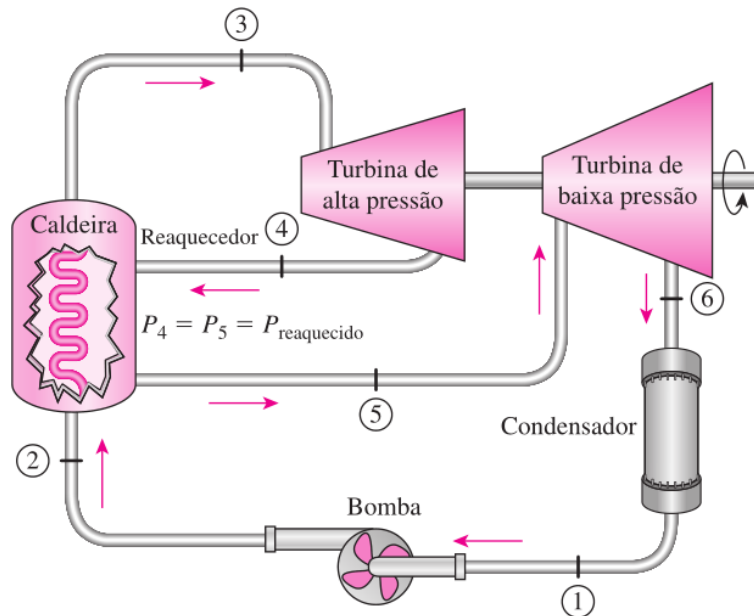
# Melhorando o rendimento do Ciclo Rankine

- Aumentando o trabalho líquido:
- Reaquecendo o vapor.



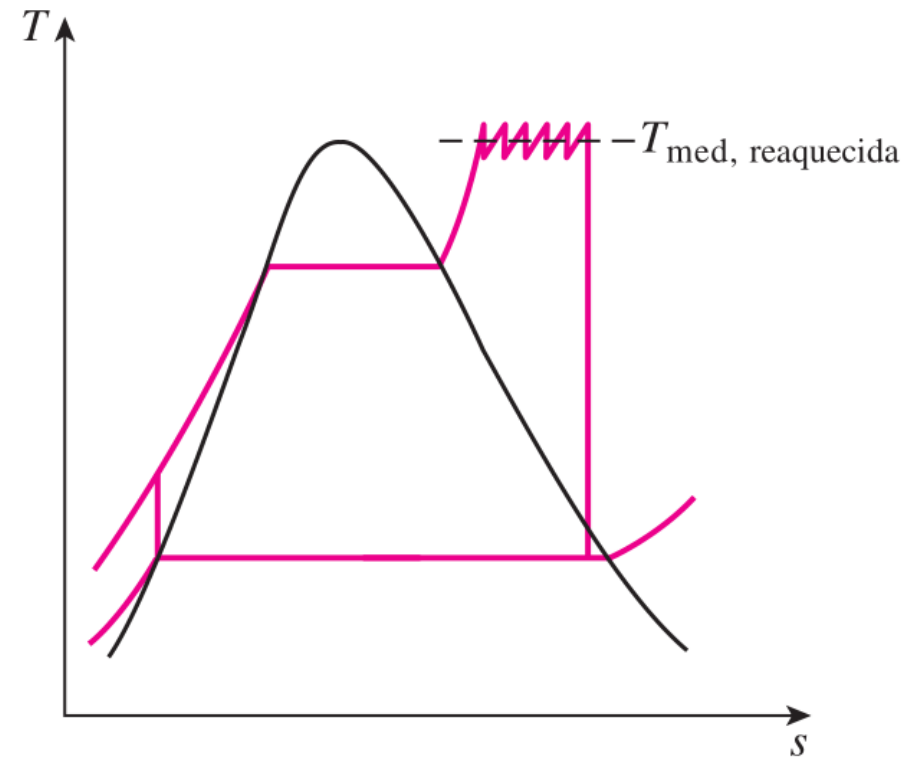
# Reaquecendo o vapor

O reaquecimento é uma solução prática para o problema de umidade excessiva nas turbinas, e é normalmente utilizado nas usinas a vapor modernas.



# Reaquecendo o vapor

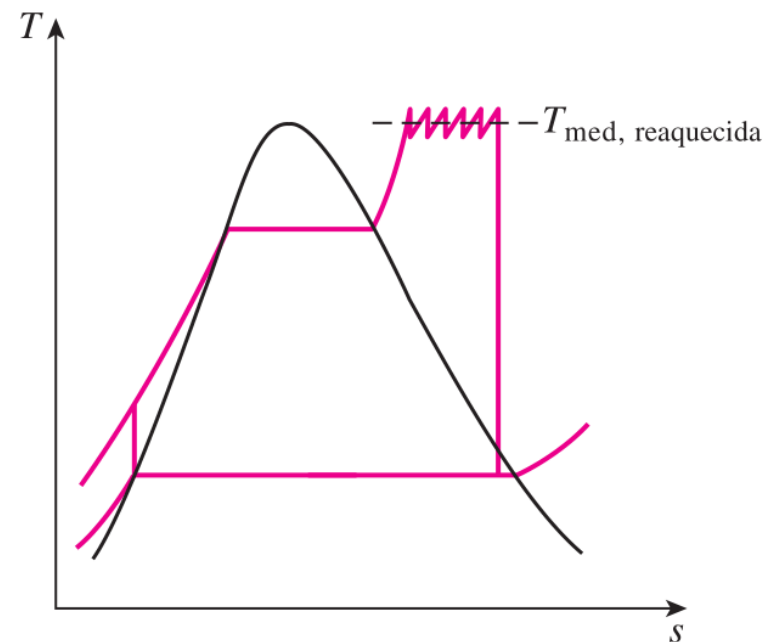
- A incorporação de um único reaquecimento em uma usina moderna aumenta a eficiência do ciclo em 4 a 5%;
- É possível aumentar a temperatura média durante o processo de reaquecimento, aumentando o número de estágios de expansão e reaquecimento;
- Entretanto, o uso de mais de dois estágios de reaquecimento não é prático;





# Reaquecendo o vapor

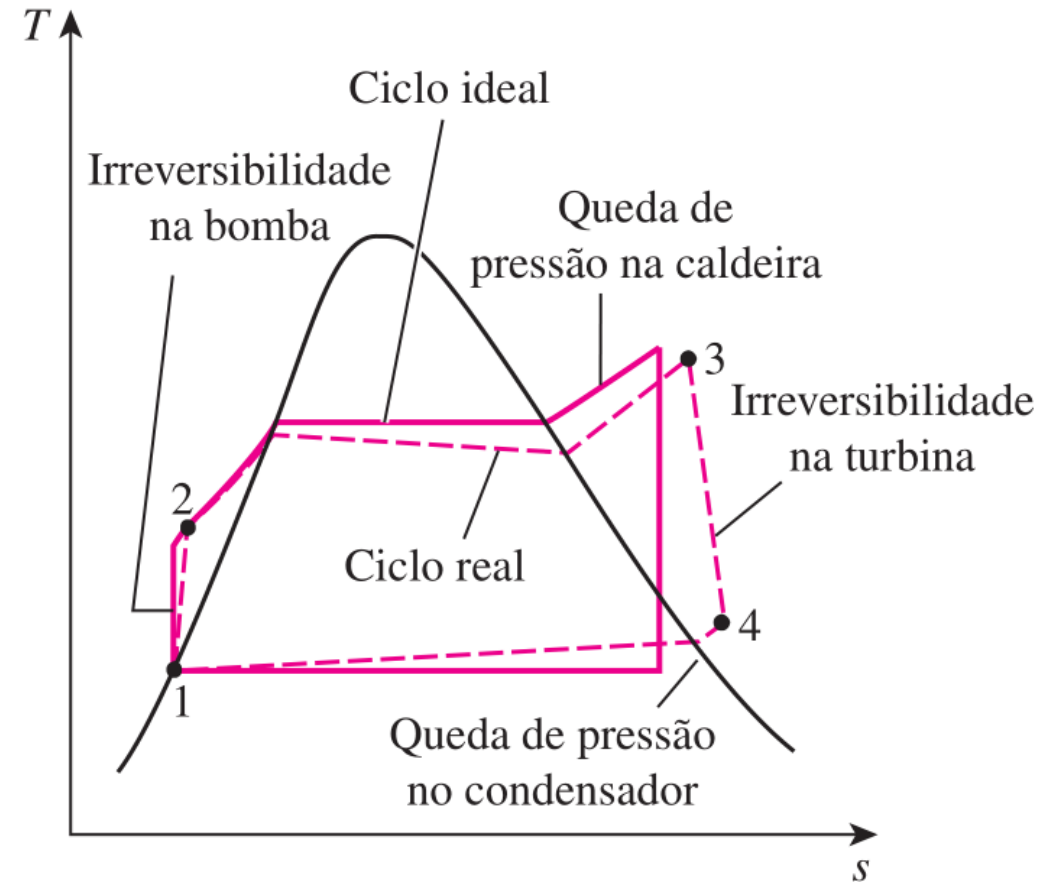
- Se a pressão de entrada da turbina não for suficientemente alta, um reaquecimento duplo resultaria em descarga da turbina superaquecida;
- Isso não é desejável, pois aumentaria a temperatura  $T_{L,med}$ ;
- A pressão ótima de reaquecimento é de cerca de um quarto da pressão máxima do ciclo;
- A única finalidade do ciclo com reaquecimento é reduzir o conteúdo de umidade do vapor nos estágios finais do processo de expansão;
- Se tivéssemos materiais que resistissem de forma satisfatória a altas temperaturas, não haveria necessidade do ciclo com reaquecimento.



# Irreversibilidad

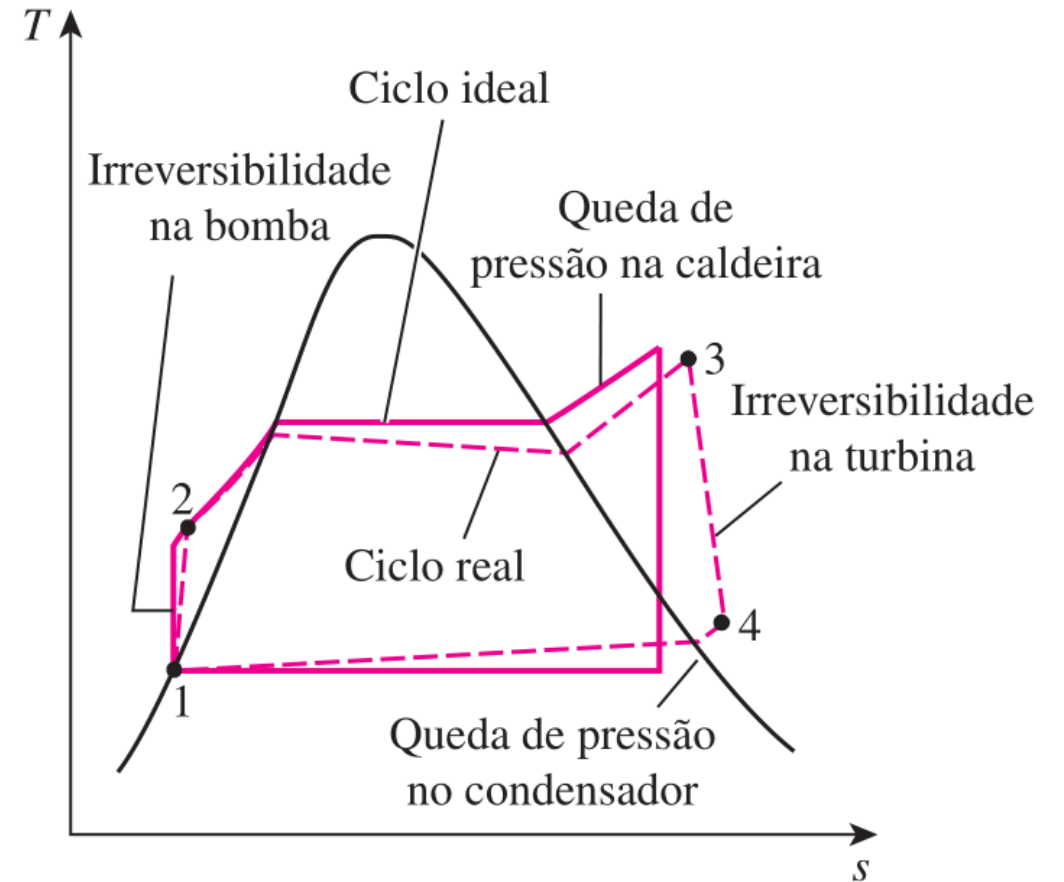
# Irreversibilidades

- O **atrito no fluido** causa **queda de pressão** na caldeira, no condensador e nas tubulações entre os diversos componentes.
- -A outra fonte importante de irreversibilidade é a **perda de calor** do vapor para a vizinhança à medida que esse escoia através dos diversos componentes.
- Também existem **as irreversibilidades que ocorrem dentro da bomba e da turbina**, fazendo que esses processos tenham **geração de entropia** e não sendo isentrópicos



# Irreversibilidades

- **COMBUSTÃO E TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA PARA A ÁGUA;**
- **TURBINA;**
- **BOMBA;**
- Condensador;
- Perda de carga;
- Perdas por radiação.



# Bibliografia

---

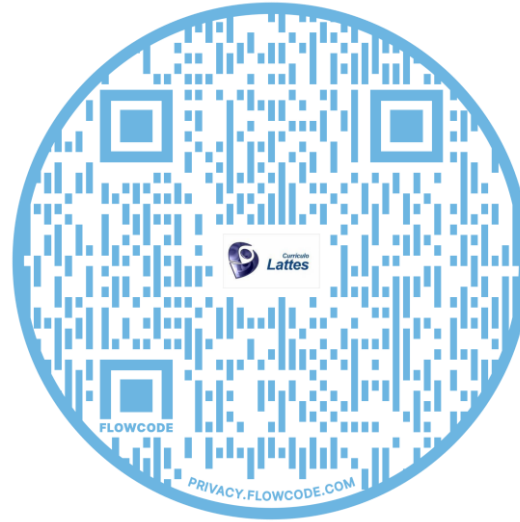
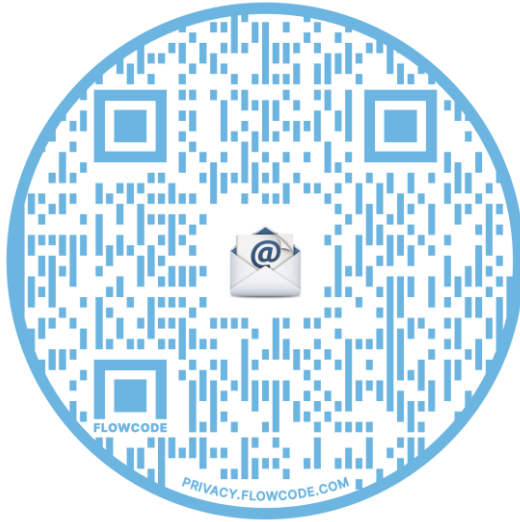
ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.; BUESA, Ignacio Apraiz. termodinâmica. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

---

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D. Princípios de termodinâmica para engenharia . Grupo Gen-LTC, 2000.

---

ENERGÉTICA, Eficiência. Conservação de Energia.



**DSc. Eng. Samuel Moreira Duarte Santos**

**(21) 9 8003-1100**

**samuelfmoreira@id.uff.br**

**<https://www.linkedin.com/in/samuel-moreira-a3669824/>**

**<http://lattes.cnpq.br/8103816816128546>**